



100m 超長距離投影手法を用いた空中ディスプレイとその検証

山本真平¹⁾, 奥寛雅²⁾

1) 群馬大学大学院情報学研究科 (〒 371-8510 群馬県前橋市荒牧町 4-2, j251a026@gunma-u.ac.jp)

2) 群馬大学情報学部 (〒 371-8510 群馬県前橋市荒牧町 4-2, h.oku@gunma-u.ac.jp)

概要: 近年, 空中に映像を表現する技術が注目を浴びている. より少ないコストで空中ディスプレイを実現するために, 100m 先の球体スクリーンへの長距離動的投影の手法が提案されている. これまでは, 地上で人力で動かしていた球体スクリーンに対する投影のみが報告されている. 本発表では, 5m 程度上空に引き上げた球体スクリーンに投影を行うことで, 空中に存在するスクリーンに対して投影が可能であることを示した結果を報告する.

キーワード: 空中ディスプレイ プロジェクター ドローン

1. はじめに

近年, 空中に映像を提示する空中表示技術が注目されている. その一例として, 東京オリンピックで活用されたドローンショーが挙げられる [1][2][3]. しかし, ドローンショーは多数のドローンと照明を用いるため高コストであり [4], 小規模なイベントでの利用が困難であるという課題がある.

この課題に対し, ドローンを用いた空中映像表示技術の研究が活発に行われている [9][10][11]. 空中ディスプレイの実現手法は複数存在する. 一つは, ドローン自体に発光機器を搭載し, ディスプレイとして機能させる方法である. しかしこの手法は, ドローンのペイロード制限により搭載可能なディスプレイや電源が制約される点や, 機体重量の増加が墜落時の安全性を損なうという課題を有する.

もう一つの手法は, ドローンにスクリーンとなる物体を搭載し, 外部から映像を投影する方式である [6][7]. 本研究ではこの後者の手法に着目し, 空中ディスプレイの実現を目的とする.

筆者らの研究グループでは, HoverCanvas と呼ばれる遠方に位置する移動物体へ動的投影が可能なシステムを用いた 1 機のドローンに吊るした球体スクリーンに動的プロジェクションマッピングを行う手法が提案されている [12].

簡単な概要を図 1 に示す.

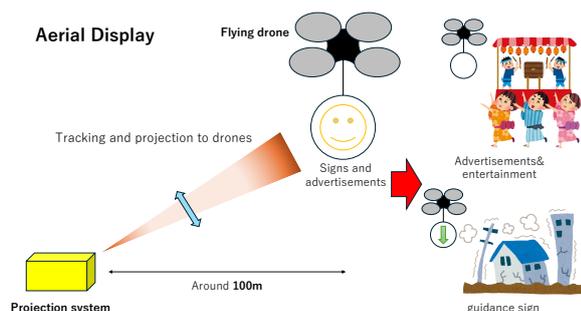


図 1: Schematic figure of the HoverCanvas concept

しかし, この先行研究における性能評価は, 投影対象である球体スクリーンを地上で人為的に動かす実験に留まっていた.

そこで本研究では, 高所作業車を用いて球体スクリーンを高度約 5m まで上昇させた状態で投影実験を行い, その有効性を検証した結果について報告する.

2. HoverCanvas の投影システム

本章では, 球体スクリーンへ動的に映像を投影するシステムである HoverCanvas の構成について述べる. システムの全体構成図を 2 に示す.

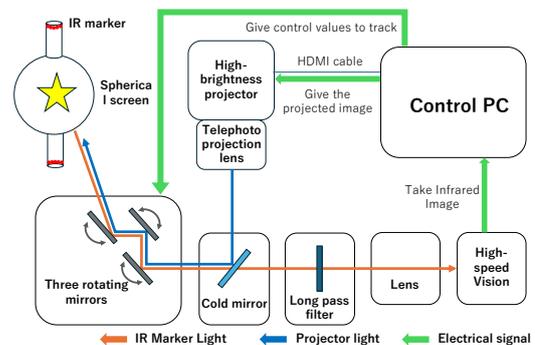


図 2: projection system for HoverCanvas

本システムは, 主要な構成要素として, カメラの視線方向を高速に制御する「望遠 3 枚鏡方式視線制御システム」と, 望遠投影レンズを備えた高輝度プロジェクターから成る. この視線制御システムは, 3 枚の回転鏡を用いてカメラの視線を高速に制御する機構である Saccade Mirror3[5] を基に開発されたものである. その構成を図 3 に示す.

本システムは, 後方に配置された高速カメラ (1000 fps) と, その前方に設置された 3 枚の回転鏡 (M1, M2, M3) から構成される. 3 枚の回転鏡を高速に制御することにより, カメラ本体を動かすことなく, その視線方向を任意に変化

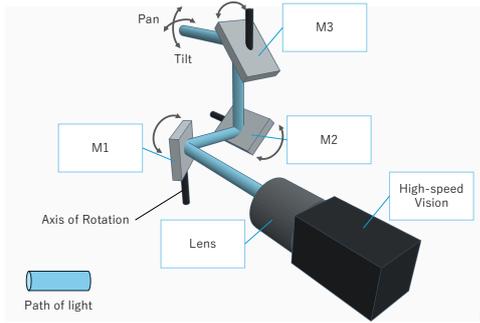


図 3: Saccade Mirror3

させることが可能となる。

本システムは夜間の利用を想定しているため、暗所での対象検出を安定して行う目的で、追尾対象の球体スクリーンには目印として赤外光 LED マーカーを取り付ける。カメラのレンズと回転鏡の間には、赤外光のみを透過させるロングパスフィルターを配置する。これにより、カメラはマーカーの赤外光のみを選択的に撮像し、環境光など外乱光の影響を抑制する。システムは、この赤外光マーカーの重心を常に画像の中心で捉えるよう、3枚の回転鏡をフィードバック制御し、カメラの視線方向を追従させる。

映像投影は、制御用 PC 上で生成した投影画像をプロジェクターから投射することで行う。プロジェクターの光路は、可視光を反射し赤外光を透過する特性を持つコールドミラーを介して、視線制御用の回転鏡へと導かれる。これにより、プロジェクターの光路とカメラの光路が同軸化され、カメラが追尾している視線方向に正確に映像を投影することが可能となる。この光学系は、プロジェクターからの可視光がカメラの撮像素子へ入ることを防ぐため、安定した赤外光マーカーの追尾も同時に実現する。なお、プロジェクターには長焦点レンズが装着されており、遠距離への鮮明な投影に対応している。

2.1 赤外光 LED マーカー

追尾に用いる IR マーカーの構造について詳述する。製作したマーカーの外観を図 4 に、投影位置の推定概要を図 5 に示す。

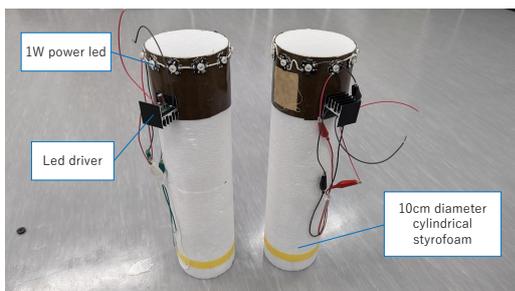


図 4: IRmarker

マーカーの基部には、直径 100mm、高さ 400mm の円柱

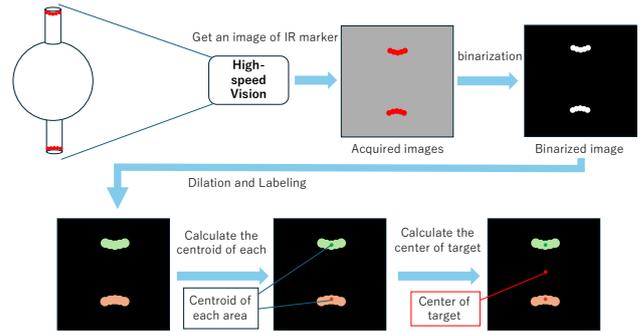


図 5: Summary of center of target calculation

状発泡スチロールを用いる。その側面には、LED の排熱を目的とした薄型ヒートシンクを介して、1W の赤外光パワー LED が水平に複数個取り付けられている。電源と LED の間には、電流を 1A に制御するための定電流ドライバを接続している。

本研究では、この IR マーカーを 2 つ製作し、直径 2.3m の球体スクリーンの両極（対極の位置）にそれぞれ配置する。この配置には以下の利点がある。

- 検出安定性の向上：スクリーンが傾いた際に一方のマーカーが隠れても、もう一方が視認可能であるため、検出不能となる角度が減少し、安定した追尾が実現できる。
- ロバスト性の向上：片方のマーカーが一時的に検出不能となった場合でも、もう一方のマーカーを追尾し続けることで、ロストすることなく継続的なトラッキングが可能となる。
- 投影位置補正の高速化：2 つのマーカーの撮像上の重心と、投影対象である球体スクリーン中心が一致するように設計されている。これにより、投影位置の複雑な推定計算が不要となり、投影像のズレ補正を高速なミラー制御のみでリアルタイムに行うことができる。

2.2 スクリーンの中央推定手法

以下に、カメラで取得した 2 つのマーカー画像から、投影目標点であるスクリーン中心を算出する画像処理手順を述べる。

1. カメラで取得した画像に対し 2 値化処理を行い、事前に定めた閾値以上の輝度を持つ画素のみを抽出する。
2. ノイズ除去のため、抽出した画素領域に対して膨張・縮小処理を適用する。
3. 処理後の 2 つの領域に対してラベリングを行い、それぞれの重心位置を算出する。
4. 算出した 2 つの重心の中点を、投影目標点である球体スクリーンの中心と定義する。

システムは、この算出された中心点が常に画像の中心に来るように、飯田らが提案した手法 [5] に基づき 3 枚の回転鏡を制御し、視線方向を調整し続ける

3. 評価実験

提案手法により実際に遠距離での投影が可能であるかを確かめるために評価実験を行った。

具体的には、投影機材から 100m 離れた地点にある高所作業車の座席部分に直径 2.3m のスクリーンを吊るし、そのスクリーンに対して投影を行った。高所作業車の座席部分を稼働させることで空中での移動を実現した。ここで IR マーカーの電源はここで電源は 1.5V 乾電池を 16 本繋いだものを使用している。

この実験では、投影像がスクリーンからはみ出さずに投影ができるか、また、投影像が明るく鮮明な状態で観察者から観察し続けられているかの確認を行った。実験は投影像の視認性を高めるために夜間に行った。ここで、投影機材と投影対象であるスクリーンの間には遮るものがないものとする。実験に用いた機材を以下に示す。

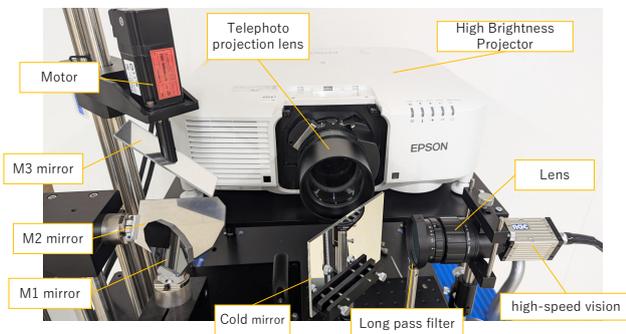


図 6: Appearance of projection system



図 7: Appearance of Screen

図 6 は HoverCanvas のプロジェクションシステムである。これらのシステムは台車の上に構成されており、その台車に制御用 PC や回転鏡の駆動に必要なモーターを積載し、ケーブルで接続して使用している。

図 7 は球体スクリーンにマーカーを取り付けた際の画像である。

実験に使用した機材は以下の通りである。

- 望遠 3 枚鏡視線制御システム

- 制御用 PC: CPU: intel, Xeon E5-2634v4 (3.4GHz), メモリ: 64GB, GPU: NVIDIA Quadro M2000, OS: Windows 11
- カメラ: N-Box (Nac) 640 × 480, 1000fps
- レンズ: #86-410 (edmund), F 値: f/2.8-f/22, 焦点距離: 100.00mm
- M1, M2 スキャナー: 6260H (ケンブリッジテクノロジー)
- M3 ミラー: 独自に設計されたミラー,
- モーター: SGMAV-C2ADA21 (安川電機)
- ダイクロイックミラー: 50mm × 50mm 45°, グリーンダイクロイックフィルター (Edmund Optics)
- ロングパスフィルター: 反射波長 (nm) 200 - 735, 透過波長 (nm) 765 - 1650 (Edmund Optics)

● プロジェクター

- 高輝度プロジェクター: EB-PU1007W (セイコーエプソン)
- 長焦点レンズ: ELPLL08 (セイコーエプソン)

● スクリーン

- アドバルーン ED-001b7 2.3m 丸球 (イベントグッズ スマイル館)

● 赤外 LED マーカー

- 1W POWER LED (千石電商)
- 円柱型発泡スチロール Φ 100x400mm × 2
- LED ドライバ: LED 用定電流ドライバモジュール (Strawberry Linux)
- ヒートシンク: 貼るヒートシンク (サンハヤト)

- 高所作業車: 日野自動車 車両総重量 6175 t 最大地上高 9.9 m

ここで、この実験で使用しているプロジェクターの遅延時間について説明する。筆者らの計測によれば、投影像の更新信号を送信してから、実際に投影像が更新されるまでの遅延時間はおよそ 55ms であった。

また、この実験では図??の画像を投影に使用した。

3.1 実験結果

投影実験の結果の画像を以下に示す。

この実験結果から、5m 程度上空にあるスクリーンに対しても投影増がはみ出ることなく投影可能であることが確認できた。

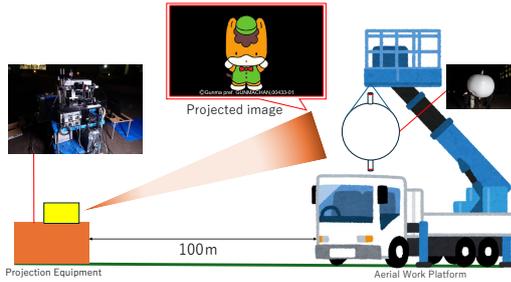


図 8: experimental environment

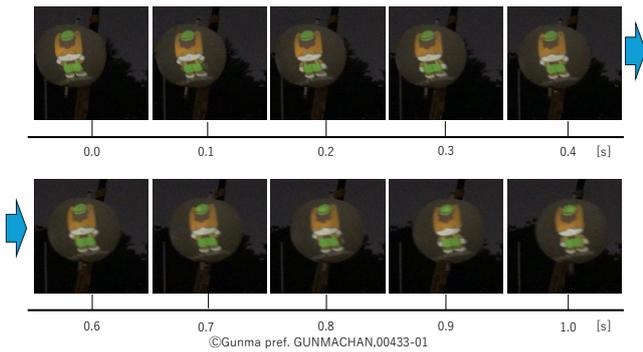


図 9: Appearance of Screen

4. まとめ

本研究では、動的投影を用いた空中ディスプレイを実現するために、HoverCanvas を用いて 100m 先にある 2.3m の大型バルーンに対する長距離動的投影を可能にした。評価実験では、100m 先にある高所作業車に吊るした球体スクリーンに対して、スクリーンが傾いたり移動した場合にも投影像がスクリーンに投影され続け、はみ出ることなく留まっていることを確認した。

謝辞

本研究の一部は JST CREST JPMJCR23B2, 未来社会創造事業 JPMJMI24H1, JSPS 科研費 JP24K02971, JP24K15843, 令和 4(2022) 年度～令和 6(2024) 年度群馬大学重点支援プロジェクト (G3), ならびに令和 7(2025) 年度群馬大学重点支援プロジェクト (G2) の支援を受けたものであり、ここに謝意を表す。

参考文献

[1] Intel , "Intel Technology Brings Out the Wonderful in Everything" ,https://www.youtube.com/watch?v=u9-MO4_aA9A&t=2s, Online; accessed 15-January-2025.
 [2] Sky Eleents , "Sky Elements Ignites the NCAA Men's Final Four with an Electrifying Texas Drone Light

Show!" , <https://skyelementsdrone.com/drone-events/sky-elements-ignites-the-ncaa-mens-final-four-with-an-electrifying-texas-drone-light-show/> , Online; accessed 15-January-2025.
 [3] LUMASKY , "1,500 Drone Show to Illuminate the Story of Khaybar" , <https://lumasky.show/projects/1500-drone-show-to-illuminate-the-story-of-khaybar/> , Online; accessed 15-January-2025.
 [4] DRONE SHOW SOFTWARE , "How much does the Drone Show Cost?" , <https://www.droneshowsoftware.com/news/how-much-does-the-drone-show-cost> , Online; accessed 15-January-2025.
 [5] 飯田和久 奥寛雅, "3 枚の回転鏡を用いた高速かつ広範囲な視線制御機構用ミラーの開発", ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2016 (0), 2A1-19b5-,2016
 [6] Shino Higuchi and Hiromasa Oku , "Wide angular range dynamic projection mapping method applied to drone-based avatar robot" , Advanced Robotics,vol.35,no.11,pp.675-684,2021.
 [7] Masatoshi Iuchi and Yuito Hirohashi and Hiromasa Oku , "Proposal for an aerial display using dynamic projection mapping on a distant flying screen" , 2023 IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR) , pp.603-608,2023.
 [8] Yuito Hirohashi and Hiromasa Oku , "Aerial Display Method Using a Flying Screen with an IR Marker and Long Range Dynamic Projection Mapping" , SA'23: SIGGRAPH Asia 2023 Posters,pp.1-2,2023.
 [9] Wataru Yamada , "Spherical Drone Display" , The Journal of Image Information and Television Engineers,vol.72,no.4,pp.504-507,2018.
 [10] Tobita Hiroaki and Maruyama Shigeaki and Kuzi Takuya , "Floating Avatar: Telepresence System Using Blimps for Communication and Entertainment" , Association for Computing Machinery,pp.41-550,2011.
 [11] Gomes, Antonio and Rubens, Calvin and Braley, Sean and Vertegaal, Roel , "BitDrones: Towards Using 3D Nanocopter Displays as Interactive Self-Levitating Programmable Matter" , Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems,pp.770-780,2016.
 [12] 山本真平, 廣橋唯人, 奥寛雅, HoverCanvas:100m 長距離動的投影とドローンによる空中ディスプレイ, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2025 (ROBOMECH2025) (山形ビッグウイング, 山形, 2025.6.5) / 予稿集, 2A1-S09